

**Кундрат М. М., д.т.н., професор** (Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, [m.m.kundrat@nuwm.edu.ua](mailto:m.m.kundrat@nuwm.edu.ua))

## **ВІДШАРУВАННЯ ПІДСИЛЮЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА МОСТОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

**За умов плоскої задачі досліджено відшарування жорсткого гнучкого підсилюючого елемента мостової конструкції при навантаженні циклічними напруженнями. Відшаруванню передують розвиток локалізованих зон передруйнування (ослабленого контакту), яким можуть відповідати області накопичення пошкоджень, часткового розриву зв'язків та ін. Отримано аналітичні залежності зміни робочої довжини підсилюючого елемента залежно від амплітуди навантаження та кількості циклів.**

**Ключові слова:** підсилення; відшарування; зона передруйнування; робоча довжина; кількість циклів.

Підсилення мостових конструкцій необхідне у випадках тривалої експлуатації без своєчасного технічного обслуговування та капітальних ремонтів, коли присутні помилки проектування, виготовлення або виконання будівельних робіт, недостатньої міцності матеріалів конструкцій, а також зміни погодних умов та діючих нормативних документів в Україні [1]. Задача розрахунку підсилюючих елементів як одного із поширених засобів ремонту та відновлення працездатності інженерних конструкцій, зважаючи на те, що велика кількість матеріаломістких мостових споруд України близька до вичерпання свого проєктного ресурсу, залишається на часі.

Використовувані підкріплюючі елементи одночасно є й потужними концентраторами напружень і спричиняють нелінійні та пластичні деформації, що в значній мірі ускладнює розрахунок напружено-деформованого стану та умов граничної рівноваги мостової системи в цілому. Внаслідок неоднорідності напруженого стану біля підсилень слід очікувати [2] порушення адгезійних зв'язків, розпушення, нелінійного деформування. Вплив малих зон пластичності матеріалу в околі країв підкріплення на розподіл контактних напружень досліджував Ю. І. Кудишин [3; 4], використовуючи ітераційний метод пружних розв'язків

О. І. Ільюшина. У такій постановці отримані більш прийнятні обмежені напруження в околах країв підсилювального ребра, причому найбільших значень розрахункові пластичні деформації досягалися біля навантажених зосередженими силами його кінців. Для числового прикладу взято м'яку сталь типу Ст. 3 із необмеженою по деформаціях площадкою текучості.

Аналізу особливостей втомного відшарування високомодульного підсилення стосуються праці [5–8]. Нижче з використанням ідеї праць [9; 10] отримано аналітичний розв'язок модельної задачі відшарування гнучкого підсилення при навантаженні циклічними напруженнями. За неперервного навантаження розв'язок задачі зведено до задачі Коші для диференціального рівняння першого порядку, а при циклічному – до інтегрування заданої функції від параметрів навантаження та пружних і міцнісних характеристик системи.

**Постановка задачі.** За умов плоскої задачі теорії пружності розглянемо півбезмежну пластину, навантажену циклічними зусиллями інтенсивності  $q = q_0 + \Delta q \sin \omega t$  направленими паралельно до її краю (рис. 1), де  $\omega$  – кругова частота,  $\Delta q \ll q_0$ ,  $0 \leq q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$ . Вільна поверхня пластини підкріплена гнучким нерозтягливим підсиленням завдовжки  $2a$ . Осі декартової системи координат  $xOy$  збігаються з осями геометричної симетрії композиції. Приймаємо, що частота зміни навантаження невелика й інерційні та теплові ефекти неістотні.

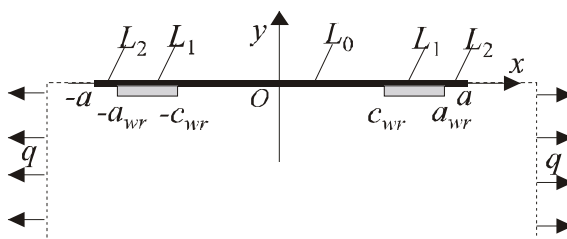


Рис. 1. Схема відшарування підсилюючого елемента

Вважаємо, що в околах кінців підсилення при певній комбінації значень амплітуди та кількості циклів навантаження буде ковзне відшарування (втрата зв'язку), яке просуватиметься вздовж межі поділу матеріалів від кожного краю до центральної частини. Довжину підсилення без відшарованих на кінцях фрагментів позначаємо через  $2a_{wr}$  і називаємо робочою довжиною підсилення

(рис. 1). Коефіцієнт тертя на відшарованій частині  $L_2 \approx a_{wr} < |x| \leq a$  приймаємо рівним нулю. Відшаруванню передують розвиток локалізованих зон передруйнування, які моделюємо додатковими розрізами  $L_1 \approx c_{wr} \leq |x| < a_{wr}$  з дотичними напруженнями  $\tau_s^*$  на кромках:

$$\sigma_{xy} = \tau_s^* \text{sign}(x) \quad (x \in L_1). \quad (1)$$

Запровадження у такий спосіб зони передруйнування дає можливість отримати обмежені напруження в усіх точках композиції, які дають механічно коректну картину деформування, що задовольняє також і закон парності дотичних напружень. З просуванням ділянки розшарування рухається також і зона передруйнування. Величину  $\tau_s^*$  вважаємо усередненим значенням напружень в зоні передруйнування з урахуванням циклічного зміцнення чи розміцнення матеріалу. На ділянці  $|x| \leq c_{wr}$  зберігається ідеальний контакт, тому поздовжні деформації на ній рівні нулю:

$$\partial u(x)/\partial x = 0 \quad (x \in L_0). \quad (2)$$

Необхідно знайти аналітичні залежності зміни робочої довжини підсилюючого елемента  $a_{wr} = a_{wr}(n, q_{\max}, q_{\min}, \tau_s^*, G, \nu)$  від кількості циклів та амплітуди навантаження.

**Розв'язування задачі.** Для побудови рівняння відшарування використаємо енергетичний підхід, який передбачає існування критичного значення енергії  $\gamma_\tau^*$ , необхідної для того, щоб робоча довжина підсилення зменшилася на одиницю довжини, яку вважаємо відомою характеристикою композиції.

З іншої сторони, при зменшенні робочої довжини підсилення на величину  $\Delta a_{wr}$  напруження виконують роботу  $\gamma_\tau^* = \tau_s^* \delta_{2cf}$ , де  $\delta_{2cf}$  – критичний зсув у зоні передруйнування. Приймаємо, що робоча довжина  $a_{wr}$  і розмір зони передруйнування  $d_f = a_{wr} - c_{wr}$  – функції від навантаження  $q$ . Тоді при збільшенні навантаження на малу величину  $\Delta q$  і просування області відшарування на  $\Delta a_{wr}$  дисипація енергії

$$W_f = 2 \int_{a_{wr} - \Delta a_{wr}}^{a_{wr} - d_f - \Delta a_{wr}} \sigma_{xy}(x) [u(x, a_{wr}(q + \Delta q), c_{wr}(q + \Delta q)) - u(x, a_{wr}(q), c_{wr}(q))] dx,$$

де  $W_f = \eta_1 \gamma_\tau^* \Delta a_{wr}$ ,  $\eta_1$  – поправковий коефіцієнт. Нехтуючи

доданками порядку  $(\Delta a_{wr})^2$ , звідси знаходимо, що

$$\gamma_{\tau}^* \eta_1 = -2\tau_s^* \frac{d}{da_{wr}} \int_{a_{wr}-d_f}^{a_{wr}} x \frac{\partial u(x, a_{wr}, q)}{\partial x} dx - 2\tau_s^* \frac{du(a_{wr}, a_{wr}, q)}{da_{wr}}. \quad (3)$$

Для визначення виразів для переміщень та їх похідних використовуємо розв'язок відповідної (1), (2) задачі за сталого навантаження  $\sigma_{xx}^{\infty} = q$  [11–14]. Тоді в зонах передруйнування

$$u(x) = \frac{(\kappa + 1)\tau_s^*}{4\pi G} [a_{wr}\Gamma_2(x, a_{wr}, c_{wr}) - x\Gamma_1(x, a_{wr}, c_{wr})], \quad (x \in L_1), \quad (4)$$

$$\Gamma_1(x, a_{wr}, c_{wr}) = [\zeta^-(x)/\zeta^+(x)], \quad \zeta^{\pm}(x) = a_{wr}\sqrt{x^2 - c_{wr}^2} \pm x\sqrt{a_{wr}^2 - c_{wr}^2},$$

$$\Gamma_2(x, a_{wr}, c_{wr}) = \ln[\eta^-(x)/\eta^+(x)], \quad \eta^{\pm}(x) = \sqrt{a_{wr}^2 - c_{wr}^2} \pm \sqrt{x^2 - c_{wr}^2};$$

$\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$  – для плоского напруженого стану,  $\kappa = 3 - 4\nu$  – в умовах плоскої деформації;  $G$ ,  $\nu$  – модуль зсуву та коефіцієнт Пуассона. При цьому зв'язок між силовими та геометричними параметрами

$$c_{wr} = \frac{a_{wr}}{\text{ch}H}, \quad H = \frac{\pi q}{4\tau_s^*}. \quad (5)$$

З урахуванням результатів (4), (5)

$$\frac{\partial u(x)}{\partial x} = \frac{(\kappa + 1)\tau_s^*}{4\pi G} \ln \frac{a_{wr}\sqrt{x^2 - c_{wr}^2} + x\sqrt{a_{wr}^2 - c_{wr}^2}}{a_{wr}\sqrt{x^2 - c_{wr}^2} - x\sqrt{a_{wr}^2 - c_{wr}^2}}, \quad x \in L_1,$$

$$\int_{a_{wr}-d}^{a_{wr}} x \frac{\partial u(x)}{\partial x} dx = -\frac{(\kappa + 1)\tau_s^* H}{4\pi G} a_{wr}^2 \text{th}H,$$

$$u(a_{wr}) = \frac{(\kappa + 1)\tau_s^* a_{wr}}{2\pi G} \ln(\text{ch}H).$$

Після диференціювання по параметру робочої довжини  $a_{wr}$

$$\frac{\partial u(a_{wr})}{\partial a_{wr}} = \frac{(\kappa + 1)\tau_s^*}{2\pi G} \left( \ln(\text{ch}H) + a_{wr} \text{th}H \frac{dH}{da_{wr}} \right). \quad (6)$$

З урахуванням результатів (4)–(6) формула (3) набуває вигляду

$$\gamma_{\tau}^* = \frac{(\kappa + 1)\tau_s^* a_{wr}}{4\pi G \eta_1} \left[ 2(H \cdot \text{th}H - \ln(\text{ch}H)) + a_{wr} \left( \frac{H}{\text{ch}^2 H} - \text{th}H \right) \frac{dH}{da_{wr}} \right]. \quad (7)$$

Для числового аналізу зручно ввести безрозмірну робочу довжину підсилення

$$\lambda_{wr} = \frac{(\kappa + 1)\eta_1 \tau_s^{*2} a_{wr}}{2\pi G \gamma_\tau^*}. \quad (8)$$

Тоді  $\frac{dH}{d\lambda_{wr}} = \frac{\lambda_{wr}}{a_{wr}} \frac{dH}{da_{wr}}$  і в умовах плоского напруженого стану, враховуючи, що  $E = 2(1 + \nu)G$ :

$$\lambda_{wr} = \frac{4\eta_1 \tau_s^{*2} a_{wr}}{\pi E \gamma_\tau^*}.$$

Шукану залежність між знерозміреними навантаженням  $H$  та довжиною  $\lambda_{wr}$ , враховуючи результати (6)–(8), подамо у вигляді диференціального рівняння першого порядку

$$\frac{dH}{d\lambda_{wr}} = \frac{2}{f(H, \lambda_{wr})}, \quad (9)$$

$$f(H, \lambda_{wr}) = \frac{1 + \lambda_{wr} (\ln(\operatorname{ch} H) - H \operatorname{th} H)}{\lambda_{wr}^2 (H / \operatorname{ch}^2 H - \operatorname{th} H)},$$

яке описує зміну робочої довжини підсилення від навантаження. При розв'язуванні конкретної задачі його необхідно доповнювати початковою умовою, яка задає навантаження при відомій початковій робочій довжині підсилення

$$\lambda_{wr}(H = H_0) = \lambda_0, \quad (10)$$

де  $\lambda_0$  – робоча довжина підсилення за фіксованого навантаження  $H = H_0$ . Таким чином, розв'язок задачі приведено до задачі Коші (9), (10) для диференційного рівняння першого порядку стосовно робочої довжини підсилення.

Наближені значення  $\lambda_{wr}^{(i)}(H^{(i)})$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$  шуканої функції  $\lambda_{wr}(H)$  визначаємо послідовно за формулами Рунге – Кутта [15]

$$\lambda_{wr}^{(i+1)} = \lambda_{wr}^{(i)} + \Delta \lambda_{wr}^{(i)}, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

де

$$\Delta \lambda_{wr}^{(i)} = \frac{1}{6} (T1^{(i)} + 2 \cdot T2^{(i)} + 2 \cdot T3^{(i)} + T4^{(i)}),$$

$$T1^{(i)} = \Delta H \cdot f(H^{(i)}, \lambda_{wr}^{(i)}),$$

$$T2^{(i)} = \Delta H \cdot f\left(H^{(i)} + \frac{\Delta H}{2}, \lambda_{wr}^{(i)} + \frac{T1^{(i)}}{2}\right),$$

$$T3^{(i)} = \Delta H \cdot f\left(H^{(i)} + \frac{\Delta H}{2}, \lambda_{wr}^{(i)} + \frac{T2^{(i)}}{2}\right),$$

$$T4^{(i)} = \Delta H \cdot f\left(H^{(i)} + \Delta H, \lambda_{wr}^{(i)} + T3^{(i)}\right).$$

На рис. 2 подано інтегральні криві при неперервному навантаженні, отримані з числового розв'язку задачі Коші (9), (10) методом Рунге – Кутта за різних початкових робочих довжин підсилення  $\lambda_0 = 0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$  та фіксованому  $H_0 = 0$ . Відповідну лінію вибираємо за її значенням на осі  $\lambda_{wr}$ , при цьому пружні та міцнісні параметри композиції враховані через змінні  $\lambda_{wr}$  та  $H$ . Значення на осі абсцис ( $H_0 = 0$ ) відповідають початковій безрозмірній довжині підсилення за відсутності навантаження. Із зростанням навантаження робоча довжина зменшується, наприклад, підсилення довжиною  $\lambda_0 = 0,25$  за навантаження  $H = 0,7$  зменшує робочу довжину до  $\lambda_{wr} = 0,249$ , тобто на 0,4% від початкової; підсилення робочої довжини  $\lambda_0 = 0,5$  до  $\lambda_{wr} = 0,4958$ , тобто на 0,84%; підсилення  $\lambda_0 = 1,5$  до  $\lambda_{wr} = 1,4568$ , тобто на 2,88% за того ж рівня навантаження. Чим менша робоча довжина підсилення, тим більше навантаження необхідне для її відшарування.

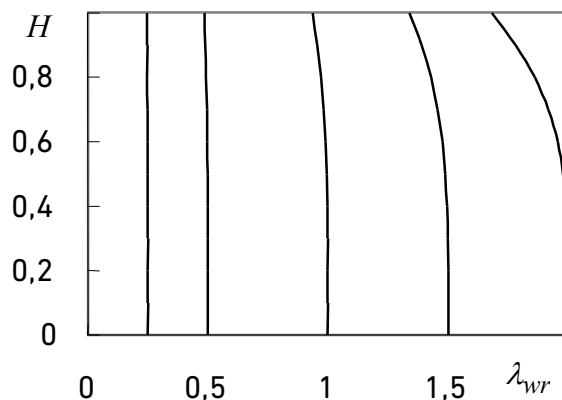


Рис. 2. Робоча довжина підсилення за неперервного навантаження

Диференційне рівняння (9) використаємо для розв'язання задачі відшарування підсилення за циклічного навантаження. Приймаємо, що відшарування проходить на кожному періоді

навантаження, а при розвантаженні робоча довжина підсилення не змінюється. Співвідношення (9) описує відшарування підсилення за час одного циклу, тому інтегруючи його від мінімального  $H_{\min}$  до максимального  $H_{\max}$  навантаження за цикл  $i$ , приймаючи величину  $\lambda_{wr}$  сталою на протязі одного циклу, отримуємо швидкість відшарування у вигляді

$$\frac{d\lambda_{wr}}{dn} = \frac{1}{2} \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} \frac{dH}{f(H, \lambda_{wr})} \equiv F_2(H_{\max}, H_{\min}, \lambda_{wr}),$$

$$H_{\min} = \frac{\pi q_{\min}}{4\tau_s^*}, \quad H_{\max} = \frac{\pi q_{\max}}{4\tau_s^*}.$$

Звідси після інтегрування знаходимо зв'язок між числом циклів навантаження та робочою довжиною підсилення

$$n = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} \frac{d\lambda_{wr}}{F_2(H_{\max}, H_{\min}, \lambda_{wr})}, \quad (11)$$

де  $\lambda_0, \lambda_1$  – початкове (при  $n = 0$ ) та кінцеве ( $\lambda_{wr} = \lambda_1$ ) значення довжини робочої частини підсилення.

На рис. 3 подана робоча довжина елемента підсилення залежно від числа циклів  $n$  за формулою (11):  $H_{\min} = 0$ ,  $H_{\max} = 0,1$ ,  $\kappa = 2,2$ ,  $\eta_1 = 1$ ; лінія 1 –  $\lambda_0 = 1,0$ ; лінія 2 –  $\lambda_0 = 0,5$ . Зі зменшенням початкової  $\lambda_0$  робочої довжини підсилення швидкість його відшарування також знижується. При цьому повного відшарування не відбувається, за умов задачі підсилення в середній частині залишається зв'язаним з основою. Швидкість відшарування істотно залежить від максимального навантаження за цикл.

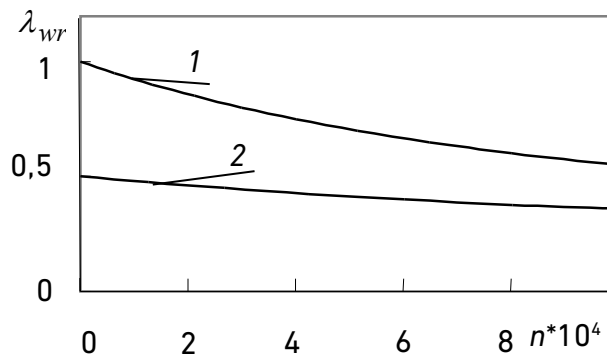


Рис. 3. Робоча довжина підсилення залежно від числа циклів

**Висновки.** Запропонована математична модель відшарування гнучкого нерозтяжливого елемента підсилення мостової конструкції від основного матеріалу. Для заданого навантаження за цикл та наперед відомій кількості циклів за формулою (11) завжди можна підібрати довжину підкріплюючого елемента таким чином, щоб його відшарування не перевищувало заданого наперед значення (чи не відбувалося зовсім). Швидкість відшарування істотно залежить від початкової робочої довжини підсилення (для довшої вона більша) та максимального навантаження за цикл. Підсилюючий елемент в середній частині за умов задачі залишається зв'язаним з основою.

**1.** Молодід О. С., Руднева І. М., Богдан С. М. Експериментальне дослідження підсилення металевих конструкцій зовнішнім армуванням методом наклеювання високоміцних композитних вуглецевих матеріалів (FRP). *Дороги і мости*. 2021. Вип. 24. С. 84–96. **2.** Сулим Г. Т. Основи математичної теорії термопружної рівноваги деформівних твердих тіл з тонкими вклученнями. Львів : ДВЦ НТШ, 2007. 716 с. **3.** Кудишин Ю. И. Задача о подкреплении полуплоскости ребром с учетом пластических свойств материала. *Строительная механика и расчет сооружений*. 1982. № 2. С. 25–28. **4.** Кудишин Ю. И. Контактная задача о подкреплении бесконечной плоскости стрингером с учетом пластических свойств материала. *Известия АН СССР. Механика твердого тела*. 1981. № 4. С. 83–92. **5.** Шацкий И. П. Отслоение разрушенного стрингера от плоско напряженной пластины. *Теорет. и прикл. механика*. 2001. Вып. 34. С. 83–88. **6.** Shatskyi I. P., Kundrat A. M. Longitudinal shear of a body with mutually immobile rigid collinear inclusions. *Materials Science*. 2004. Vol. 40, № 3. P. 55–59. **7.** Кундрат М. М. Гранична рівновага тіла з підкріплювальними елементами за сталого й циклічного навантажень. Київ : Каравела, 2021. 124 с. **8.** Sulym H. T., Pasternak I. M., Tretiak T. V. Modeling of deformable thermoelastic thread-like inclusions in isotropic media. *Journal of Mathematical Sciences*. 2023. Vol. 274, № 5. P. 660–677. **9.** Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М. : Наука, 1974. 640 с. **10.** Черепанов Г. П. О квазихрупком разрушении. *Прикладная математика и механика*. 1968. Вып. 6. Т. 32. С. 1034–1042. **11.** Колосов Г. В. Применение комплексной переменной к теории упругости. М.-Л. : ОНТИ, 1935. 224 с. **12.** Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М. : Наука, 1966. 707 с. **13.** Kundrat M. M. and Delyavskii M. V. Stresses in a half plane weakened by a crack and reinforced with a patch. *Materials Science*. 2000. Vol. 36, № 6. P. 817–824. **14.** Kundrat M. M. Delamination of an element of reinforcement of the half plane under cyclic loading. *Materials Science*. 2022. Vol. 57, № 5. P. 745–749. **15.** Копченова Н. В., Марон И. А. Вычислительная математика. М. : Наука, 1972. 367 с.

## REFERENCES:

1. Molodid O. S., Rudnieva I. M., Bohdan S. M. Eksperymentalne doslidzhennia pidsylennia metalevykh konstruksii zovnishnim armuvanniam metodom nakleivannia vysokomitsnykh kompozytnykh vuhletsevykh materialiv (FRP). *Dorohy i mosty*. 2021. Vyp. 24. C. 84–96.
2. Sulym H. T. Osnovy matematychnoi teorii termopruzhnoi rivnovahy deformivnykh tverdykh til z tonkymy vkluchenniamy. Lviv : DVTs NTSh, 2007. 716 s.
3. Kudyshyn Yu. Y. Zadacha o podkreplenny poluploskosty rebrom s uchetom plastycheskykh svoistv materyala. *Stroytelnaia mekhanyka y raschet sooruzhenyi*. 1982. № 2. S. 25–28.
4. Kudyshyn Yu. Y. Kontaknaia zadacha o podkreplenny beskonechnoi ploskosty strynherom s uchetom plastycheskykh svoistv materyala. *Yzvestiya AN SSSR. Mekhanyka tverdoho tela*. 1981. № 4. S. 83–92.
5. Shatskyi Y. P. Otsloenye razrushennoho strynhera ot plosko napriazhennoi plastyny. *Teoret. i prykl. mekhanyka*. 2001. Vyp. 34. S. 83–88.
6. Shatskyi I. P., Kundrat A. M. Longitudinal shear of a body with mutually immobile rigid collinear inclusions. *Materials Science*. 2004. Vol. 40, № 3. P. 55–59.
7. Kundrat M. M. Hranychna rivnovaha tila z pidkripliuvalnymy elementamy za staloho y tsyklichnoho navantazhen. Kyiv : Karavela, 2021. 124 s.
8. Sulym H. T., Pasternak I. M., Tretiak T. V. Modeling of deformable thermoelastic thread-like inclusions in isotropic media. *Journal of Mathematical Sciences*. 2023. Vol. 274, № 5. P. 660–677.
9. Cherepanov H. P. Mekhanyka khрупkoho razrusheniya. M. : Nauka, 1974. 640 c.
10. Cherepanov H. P. O kvazykhрупkom razrushenyy. *Prykladnaia matematyka i mekhanika*. 1968. Vyp. 6. T. 32. S. 1034–1042.
11. Kolosov H. V. Prymenenye kompleksnoi peremennoi k teoryy upruhosti. M.-L. : ONTY, 1935. 224 s.
12. Muskhelyshvily N. Y. Nekotorye osnovnye zadachy matematycheskoi teorii upruhosti. M. : Nauka, 1966. 707 s.
13. Kundrat M. M. and Delyavskii M. V. Stresses in a half plane weakened by a crack and reinforced with a patch. *Materials Science*. 2000. Vol. 36, № 6. P. 817–824.
14. Kundrat M. M. Delamination of an element of reinforcement of the half plane under cyclic loading. *Materials Science*. 2022. Vol. 57, № 5. P. 745–749.
15. Kopchenova N. V., Maron Y. A. Vychyslytelnaia matematyka. M. : Nauka, 1972. 367 s.

---

**Kundrat M. M., Doctor of Engineering, Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne,  
m.m.kundrat@nuwm.edu.ua)

### EXFOLIATION THE ELEMENT OF REINFORCEMENT OF THE BRIDGE STRUCTURE UNDER CYCLIC LOADING

The problem of calculating reinforcing elements as one of the common means of repairing and restoring the serviceability of

engineering structures, taking into account the fact that a large number of material-intensive bridge structures in Ukraine is close to exhausting its design resource, remains timely. Strengthening of bridge structures is necessary in cases of long-term operation without timely maintenance and capital repairs, when there are errors in the design, manufacture or execution of construction works, insufficient strength of construction materials, as well as changes in weather conditions and current regulatory documents in Ukraine.

Exfoliation of the flexible hard reinforcement in conditions of plane problem under cyclic loading are researched. The development of localized zones of prefracture (weakened contact), which may correspond to the area of accumulation of damage, partial rupture of ties, etc. are precedes the exfoliation. We assume that in the vicinity of the ends of the reinforcement, with a certain combination of amplitude values and the number of load cycles, there will be sliding delamination, which will advance along the material separation boundary from each edge to the central part. The length of the reinforcement without fragments peeled off at the ends is called the working length of the reinforcement. The coefficient of friction on the exfoliated part is assumed to be zero.

Analytical dependences for changing the working length of the reinforcement depending on the amplitude of the load and the number of cycles are obtained. An energy criterion was used to construct the delamination equation, which assumes the existence of a critical value of energy necessary for the working length of the reinforcement to decrease by a unit of length, which is considered a known characteristic of the composition. For a continuous load, the solution of the problem is reduced to the Cauchy problem for a first-order differential equation, and for a cyclic – to the integration of a given function from the load parameters and the elastic and strength characteristics of the system.

For a given load per cycle and a predetermined number of cycles, using the obtained formulas, it is always possible to choose the length of the reinforcing element in such a way that its peeling does not exceed the predetermined value (or does not occur at all). The speed of exfoliation depends significantly on the initial working length of the reinforcement (it is longer for a longer one) and the maximum load per cycle. The reinforcing element in the middle part under the conditions of the problem remains connected to the base.

**Keywords:** reinforcement; exfoliation; zone of prefracture; working length; amount of cycles.